ボイラー水管溶接部の残留応力測定

利用者　○秋山泰輔
所属　　三浦工業(株)

１．目　的

弊社製作のボイラーにおいては、溶接の際に発生する残留応力除去のため、ボイラー缶体組み立て後、焼鈍処理（JIS Z 3700）を実施している。

しかしながら、水管や溶接金属の内部（表面から数mm程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やＸ線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていなかった。

中性子回析法は、数mmから数cmオーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することが出来る唯一の手段である。

ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構 原子炉JRR-3付設の残留応力測定中性子回析装置（RESA）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う

２．測定方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。ボイラーは数十本の水管と、水管端部を拘束するとで構成されており、それぞれが溶接により接合されている。試験体は以下の2サンプルを、それぞれ鋸盤にて1/6の大きさに切り出したものである。

- 組み立て後、焼鈍を実施したボイラー缶体
- 組み立て後、焼鈍未実施のボイラー缶体

測定位置を図2に示す。水管と管寄板の溶接部周辺5箇所における、軸方向、半径方向、周方向の3方向ひずみを、中性子回析法により測定した。

測定条件を表1に示す。中性子照射領域（スリット）の大きさは、3方向とも3mm×3mmとした。

水管の材質は、ボイラー・熱交換器用炭素鋼鋼管STB340（JIS G 3461）である。化学成分、及び機械的性質を表2、表3に示す。

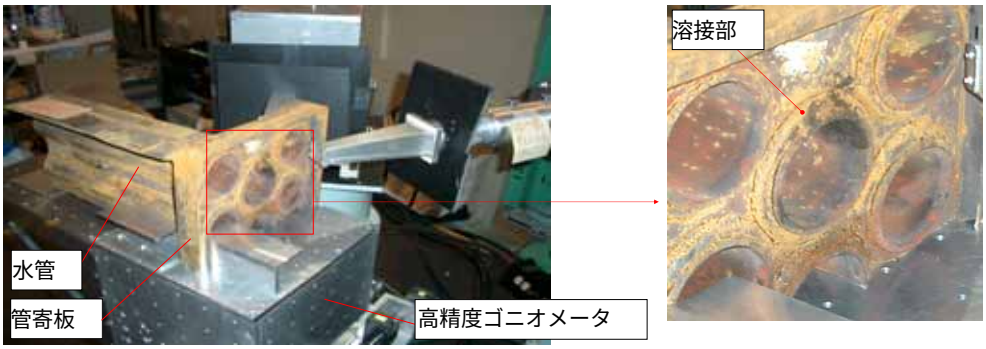

図1 試験体外観形状及び計測状況（写真は周方向応力計測時）

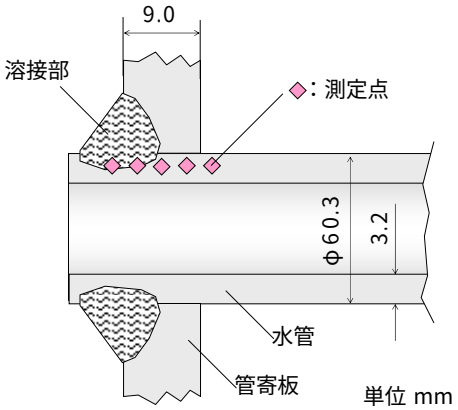

図２ 測定位置

表1 測定条件

	軸方向	半径方向	周方向
入射側スリット	3mm×3mm	3mm×3mm	3mm×3mm
回折側スリット	3mm×15mm	3mm×15mm	3mm×15mm
波長検定結果	0.207344 nm	0.207344 nm	0.207351 nm

表2 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.18以下	0.35以下	0.30～0.60	0.035以下	0.035以下

単位 wt%

表3 機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
340以上	175以上	224	0.28

３．測定結果

中性子回析法より求めた3軸方向のひずみεより、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E及びポアソン比νは、表3の値を用いる。

$$
\begin{cases}
\sigma_{Axial} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Axial} + \nu\left(\varepsilon_{Radial} + \varepsilon_{Hoop}\right)\right] \\
\sigma_{Radial} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Radial} + \nu\left(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Hoop}\right)\right] \\
\sigma_{Hoop} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Hoop} + \nu\left(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Radial}\right)\right]
\end{cases}
$$

測定結果の代表例として、軸方向と周方向の残留応力を図3、図4に示す。

焼鈍無しの場合、水管端部に最も近い測定点（x=6mm）において、軸方向では最大引張応力（図3）、周方向では最大圧縮応力（図4）の発生がそれぞれ見られた。

一方、焼鈍有りの場合、焼鈍無しの水管端部近傍に見られたような最大応力の発生は見られず、熱処理により端部の残留応力が低減されていることが分かった。

また、焼鈍無しの場合は、端部近傍（x=6～10mm）の応力分布にばらつきが見られたものの、焼鈍有りの場合のばらつきは殆ど見られなかった。

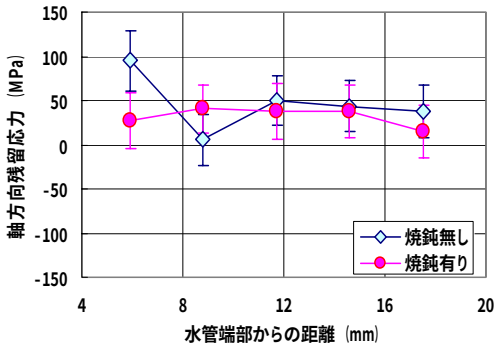

図3 軸方向残留応力測定結果

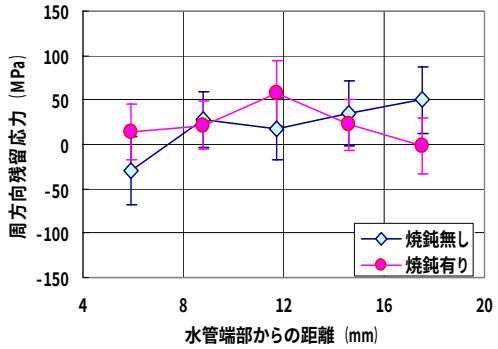

図4 周方向残留応力測定結果

４．考察

測定結果より、水管端部の残留応力低減、応力分布のばらつき低減等、焼鈍による効果が確認できた。このことから、今回のように多くの溶接箇所を有するボイラーにおいて、組み立て後に焼鈍処理を実施することは、安全担保のための重要且つ効果的な手法であることが明らかとなった。

さて、中性子回析法にて測定した残留応力を評価するに当たっては、以下の点について考慮する必要がある。本測定に用いた試験体は、測定器「RESA」の試料台の大きさ、耐荷重等の制限から、既述のようにボイラー本体を1/6に切り出したものである。切断の際に解放される残留応力を測定するため、試験体切断時に実施した「ひずみゲージ法」の測定要領と結果を図5、図6に参考として載せる。焼鈍有無の残留応力を比較すると、その差は顕著であり、且つその値は無視できない大きさであることが分かる。このことから、出来る限り切断箇所を少なくし、製品の原形に近い状態で測定することが望ましいと言える。

また、今回は測定時間の都合上、3mm角のスリットを用いたが、1mm^{3}ゲージ体積程度の微小部の短時間測定が可能であれば、より詳細で正確な残留応力が把握できる。

産業振興にとって非常に有用なこの中性子残留応力測定装置の更なる発展を切に願う次第である。

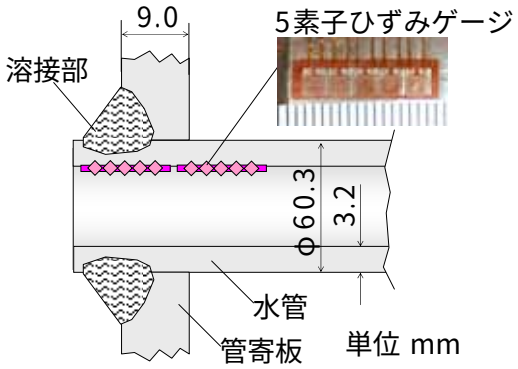

図5 ひずみゲージ法測定要領（ゲージ貼付位置）

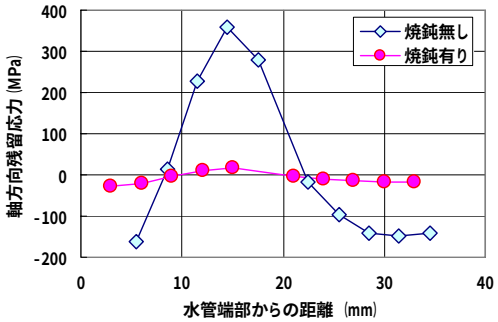

図6ひずみゲージ法 軸方向残留応力測定結果

下期課題　S15　RESA

ボイラー水管溶接部の残留応力測定

利用者　○秋山泰輔
所属　　三浦工業(株)

1.　はじめに

弊社製作のボイラーにおいては、水管端部に絞り加工を施す際に発生する残留応力除去のため、加工後、絞り部の局部焼鈍を実施している。

しかしながら、水管や溶接金属の内部（表面から数mm 程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm 程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やＸ線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていなかった。

中性子回析法は、数mm から数cm オーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することが出来る唯一の手段である。

ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構原子炉JRR-3 付設の残留応力測定中性子回析装置（RESA）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う。

2.　実験方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。試験体は以下の2 サンプルを、それぞれ鋸盤にて水管全長の約1/5 に切り出したものである。

・絞り加工後、焼鈍実施の水管
・絞り加工後、焼鈍未実施の水管（絞り加工方法：スウェージング加工）

測定位置を図2 に示す。水管絞り部周辺5 箇所における、軸方向、半径方向、周方向の3 方向ひずみを、中性子回析法により測定した。

測定条件を表1 に示す。中性子照射領域（スリット）の大きさは、3 方向とも2mm×2mm とした。

水管の材質は、ボイラー・熱交換器用炭素鋼鋼管STB340（JIS G 3461）である。化学成分、及び機械的性質を表2、表3 に示す

3.　測定結果

中性子回析法より求めた3 軸方向のひずみεより、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E 及びポアソン比ｖは、表3 の値を用いる。

$$
\begin{cases}
\sigma_{Axial} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Axial} + \nu\left(\varepsilon_{Radial} + \varepsilon_{Hoop}\right)\right] \\
\sigma_{Radial} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Radial} + \nu\left(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Hoop}\right)\right] \\
\sigma_{Hoop} = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_{Hoop} + \nu\left(\varepsilon_{Axial} + \varepsilon_{Radial}\right)\right]
\end{cases}
$$

焼鈍無し・有りの測定結果を図3、図4 にそれぞれ示す。

焼鈍無し・有り共に圧縮傾向にあったが、焼鈍無しで最大約350MPa、焼鈍有りで最大約150MPa の圧縮応力が発生しており、焼鈍無しの方が圧縮傾向は強いことが分かった。

焼鈍無しにおいては絞り傾斜部（x= 53mm）において引張のピークが見られたが、焼鈍有りではこの引張応力が圧縮応力に変化しており、焼鈍の効果があったものと思われる。

また、焼鈍無しの場合は、絞り部周辺において応力分布にばらつきが見られたものの、焼鈍有りの場合、ばらつきは殆ど見られなかった。

図1 試験体外観形状及び計測状況（写真は半径方向残留ひずみ計測時）

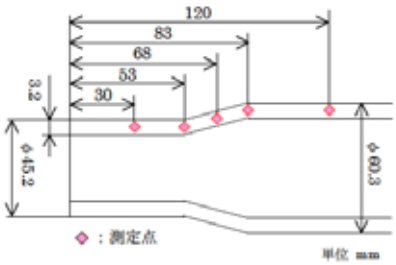

図2 測定位置

表1 測定条件

	軸方向	半径方向	周方向
入射側スリット	2mm×2mm	2mm×2mm	2mm×2mm
回折側スリット	2mm×15mm	2mm×15mm	2mm×15mm
波長検定結果	0.207340 nm	0.207349 nm	0.207349 nm

表2 化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.18以下	0.35以下	0.30～0.60	0.035以下	0.035以下

単位 wt%

表3 機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
340以上	175以上	224	0.28

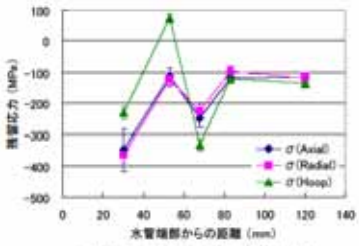

図3 残留応力測定結果（焼鈍無し）

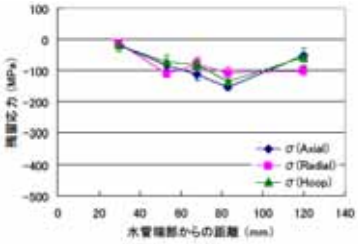

図4 残留応力測定結果（焼鈍有り）

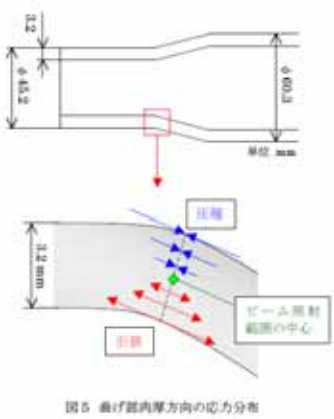

図5 曲げ部肉厚方向の応力分布

4．考察

図５に示すように、降伏点を超えるような強加工が施された傾斜部のＲがきつい部位においては、強加工によるスプリングバックによって水管肉厚部に曲げによる残留応力分布の発生が一般的に知られている。すなわち、片側表面にいくほど圧縮が強くなり（図５ ）、反対側表面にいくほど引張が強くなる（図５ ）。

今回の測定においては、ビーム照射範囲（2mm³ ゲージ体積）の中心が、肉厚の中心（図５ 部）となるよう測定しているため、圧縮と引張が相殺されている可能性がある。

ゆえに、焼鈍による応力除去効果をより正確に把握するためには、ゲージ体積をさらに小さくした上で、肉厚方向の応力分布を測定する必要がある。

しかし、焼鈍有りの測定結果より、Ｒ部も含めて応力分布のばらつきが焼鈍無しに比べて低減している点からも、焼鈍の効果は有るものと考えられる。

5．まとめ

測定結果より、絞り傾斜部の残留応力低減、応力分布のばらつき低減等、焼鈍による効果が確認できた。このことから、水管に加工を施した後に焼鈍処理を実施することは、安全担保のための重要且つ効果的な手法であることが明らかとなった。

一方、この焼鈍効果をより正確に把握するためには、水管肉厚方向の応力分布の評価も必要であろうと考える。

ボイラーヘッダ部の残留応力測定

利用者　○秋山泰輔
所属　　三浦工業㈱

1．はじめに

弊社製作のボイラーにおいては、胴板のプレス加工を施す際に発生する残留応力除去のため、加工後、胴板の焼鈍（JIS Z 3700）を実施している。

しかしながら、胴板の金属内部（表面から数mm程度）における局所的な残留応力は、金属表面や表面近傍（表面から数十μm程度）のみの測定に限られるひずみゲージ法やX線回析法等の手法では計測が困難であることから、これまで焼鈍効果を定量的に把握するには至っていなかった。

中性子回析法は、数mmから数cmオーダーの物質内部の応力状態を非破壊・非接触で測定することが出来る唯一の手段である。

ボイラーの安全性追求と、さらなる信頼性向上のため、日本原子力研究開発機構 原子炉JRR-3付設の残留応力測定中性子回析装置（MUSASHI）を用い、焼鈍前後の残留応力を測定することで、焼鈍による効果把握を行う。

2.　測定方法

試験体の外観及び計測状況を図1に示す。試験体は下記の2種類とし、試験装置の都合上（耐荷重）それぞれ鋸盤にて胴板全長の約1/25に切り出した。

プレス加工→焼鈍実施　→管寄板溶接→切断
プレス加工→焼鈍未実施→管寄板溶接→切断

測定位置を図2に示す。胴板プレス加工による曲げが最も厳しい部位における、板厚方向3点（外表面より3.50、5.75、8.00mm）を測定点とし、それぞれ縦方向、横方向、長手方向の3方向ひずみを、中性子回析法により測定した。

胴板の材質は、一般構造用圧延鋼材 SS400（JIS G 3101）である。化学成分、及び機械的性質を表1、表2に示す。

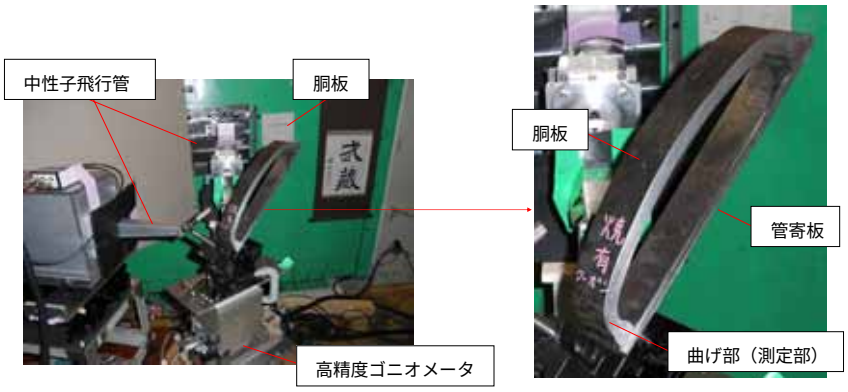

図１　試験体外観形状及び計測状況（写真は溶接長手方向残留ひずみ計測時）

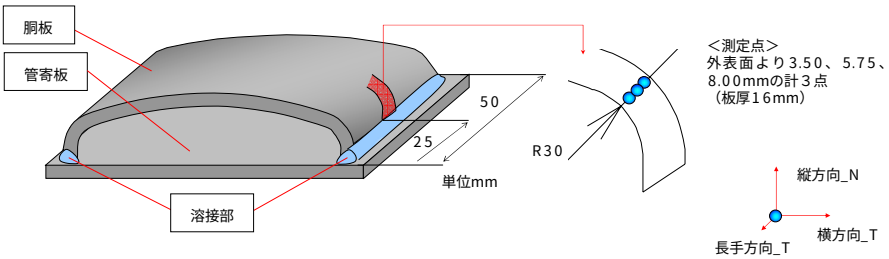

図２ 測定位置

3.　測定結果

中性子回析法より求めた3軸方向のひずみεより、以下の換算式にて残留応力を求める。式中のヤング率E及びポアソン比νは、表2の値を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_T = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_L + \nu(\varepsilon_N + \varepsilon_L)\right] \\ \sigma_N = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_N + \nu(\varepsilon_T + \varepsilon_L)\right] \\ \sigma_L = \dfrac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left[(1-\nu)\varepsilon_L + \nu(\varepsilon_T + \varepsilon_N)\right] \end{cases}$$

焼鈍無し・有りの測定結果を図3、図4にそれぞれ示す。

結果、焼鈍による残留応力への顕著な影響は見られなかった。また、焼鈍の有無に関わらず、引張の残留応力はいずれも100MPaを下回る程度であり、降伏点（284MPa）に至るほどの残留応力は発生していないことが分かった。

表1　化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.15	0.15	0.69	0.016	0.005

単位 wt%

表2　機械的特性

引張強さ MPa	降伏応力 MPa	ヤング率 GPa	ポアソン比
428	284	203	0.28

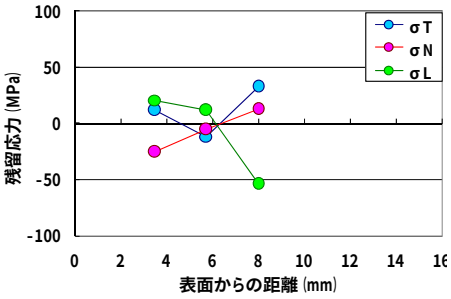

図３　残留応力測定結果（焼鈍無し）

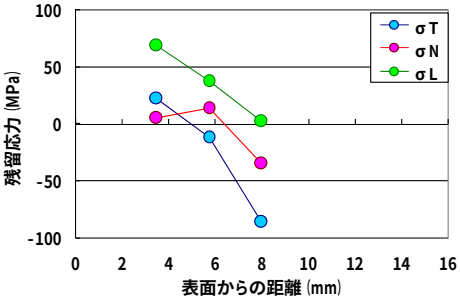

図４　残留応力測定結果（焼鈍有り）

4.　まとめ

配管周溶接継手について、従来の非破壊法では測定できなかった板厚内部も含めた多数の箇所の残留応力を測定した。測定データは、溶接残留応力の解析予測法の精度検証、従来測定法の精度やバラツキ範囲の検討等に活用する。